

学校编码: 10384
学 号: 19920091152500

分类号 _____ 密级 _____
UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

面向车载传感器的压电式振动能量
收集系统研究

Research of Piezoelectric Vibration Energy Harvesting
System for Vehicle-Mounted Sensors

何远钦

指导教师姓名: 关明杰 副教授

专 业 名 称: 精密仪器及机械

论文提交日期: 2012 年 月

论文答辩时间: 2012 年 月

学位授予日期： 2012 年 月

答辩委员会主席： _____

评 阅 人： _____

2012 年 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行）》。

另外，该学位论文为（福建省自然科学基金项目 2011J01364）课题（组）的研究成果，获得（福建省自然科学基金项目 2011J01364）课题（组）经费或实验室的资助，在（智能材料及结构）实验室完成。

（请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称，未有此项声明内容的，可以不作特别声明。）

声明人（签名）：

2012 年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认

为公开学位论文，均适用上述授权。)

声明人（签名）：

2012年 月 日

厦门大学博士论文摘要库

摘 要

汽车上有各种传感器用来专门检测温度、压力、速度和位置等，如在倒车雷达中利用超声波传感器进行测距来保证汽车安全。通常这些传感器由汽车车载电池通过电线连接进行供能。然而，随着汽车技术的发展，越来越多的传感器安装在汽车上，线路连接变得越来越复杂、维修变得很麻烦。此外，有一些嵌入式的传感器不能利用车载电池通过供电线来连接，如胎压监测传感器。因此，利用环境能量为这些分布式或嵌入式无线传感器供能引起了研究人员的兴趣。它不但可以减少安装维修带来的麻烦，而且还可以将原来被浪费掉的环境能量有效利用起来。考虑到车辆行驶中伴随产生的环境能量，振动能量是最突出的。采集环境振动能量的方法中压电换能由于高效、低成本、结构简单等优点被广泛采用。

本文结合压电发电系统与汽车振动系统，利用压电材料对汽车行驶中的振动能量进行采集，就地取材得为汽车上的传感器提供电源。本文的主要研究内容有：第一，建立汽车振动系统的数学模型，通过MATLAB\SIMULINK仿真分析汽车行驶过程中不同路面、速度下由于路面不平度而产生的振动响应，实验验证了汽车振动系统的数学模型和仿真结果；第二，基于汽车在行驶过程中的振动特性设计压电能量收集装置；通过实验得到压电能量收集装置的输出电压及功率。实验表明压电能量收集装置收集的汽车振动能量在一些路面环境下能够为传感器供能，同时提出对压电能量收集装置进一步优化的措施，以得到更高的能量收集功率。

关键词：压电效应；汽车；能量收集

Abstract

Automobiles may include sensors for obtaining information regarding various physical parameters, such as ultrasonic sensors for distance detecting during reversing. Usually these sensors are powered by wire connection with the batteries of the automobiles. However, while more and more sensors are installed to the automobiles, the wire connection turns to be troublesome. Furthermore, some embedded sensors cannot be powered by wire connection, such as the tire pressure monitoring sensors. Therefore, powering these distributed or embedded wireless sensors from ambient energy becomes attractive. It will reduce the installment trouble and maintenance costs. Piezoelectric harvesting device due to the advantages of efficiency, low cost, simple structure, is widely used in the method of collecting environmental energy.

In this paper, Piezoelectric harvesting device is designed on vehicle to provide power for some sensors in the car. The main contents of this paper are: First, to establish the mathematical model of the vehicle vibration system, to analyze the vibration response of the cars for different road surfaces and speeds by MATLAB\SIMULINK simulation, and to explore the experiments to show the agreement between the experimental results and the simulation results; Second, to design piezoelectric energy harvesting devices based on the vibration data; and to test the harvesters to get the output voltage and power. Experiment results show that sufficient energy is harvested to possibly supply a wireless sensor. It is also show that significant increases in harvested energy may be obtained by improving the harvesting device design.

Key words: Piezoelectric effects; Vehicle; Energy harvesting.

目 录

| | |
|------------------------------------|-----|
| 摘 要..... | I |
| Abstract | II |
| 目 录..... | III |
| 第一章 绪论..... | 1 |
| 1.1 研究背景 | 1 |
| 1.2 压电发电技术国内外研究现状 | 2 |
| 1.3 本文的主要研究内容 | 5 |
| 第二章 压电理论基础及压电振子仿真分析 | 7 |
| 2.1 压电理论基础 | 7 |
| 2.1.1 压电效应与压电方程..... | 7 |
| 2.1.2 压电材料..... | 9 |
| 2.1.3 压电振子的连接、支撑方式..... | 10 |
| 2.1.4 悬臂梁式压电振子数学模型..... | 11 |
| 2.2 压电振子仿真分析 | 16 |
| 2.2.1 有限元理论..... | 16 |
| 2.2.2 ANSYS 有限元分析 | 17 |
| 2.2.3 ANSYS 压电耦合场分析 | 18 |
| 2.2.4 ANSYS 有限元分析步骤 | 19 |
| 2.2.5 压电材料参数设定..... | 20 |
| 2.2.6 建立压电悬臂梁模型..... | 23 |
| 2.2.7 压电悬臂梁分析结果..... | 23 |
| 第三章 汽车振动分析及 Simulink 仿真分析 | 30 |
| 3.1 汽车振动分析 | 30 |
| 3.1.1 平稳路面下的汽车振动分析..... | 31 |
| 3.1.2 突发状态下汽车振动分析..... | 33 |
| 3.2 汽车振动 Matlab/Simulink 仿真分析..... | 36 |
| 3.2.1 汽车振动系统模型仿真..... | 36 |
| 3.2.2 路面不平度功率谱密度..... | 39 |
| 3.2.3 其他参数的选取..... | 42 |
| 3.2.4 振动仿真结果..... | 43 |
| 第四章 汽车振动实验及分析 | 49 |
| 4.1 车内振动测试 | 49 |

| | |
|--------------------|-----------|
| 4.1.1 实验平台..... | 49 |
| 4.1.2 实验结果..... | 50 |
| 4.2 能量收集及其结果 | 56 |
| 4.2.1 能量收集实验..... | 56 |
| 4.2.2 实验结果..... | 57 |
| 第五章 总结与展望..... | 62 |
| 5.1 总结 | 62 |
| 5.2 展望 | 62 |
| 参考文献 | 错误！未定义书签。 |
| 致谢..... | 错误！未定义书签。 |
| 研究生阶段论文情况 | 错误！未定义书签。 |

Contents

| | |
|--|------------|
| Abstract | I |
| Table of Contents | III |
| Chapter 1 Introduction | 1 |
| 1.1 Background | 1 |
| 1.2 Piezoelectric power generation technology research status | 2 |
| 1.3 The main content of this paper | 5 |
| Chapter 2 Piezoelectric theoretical and piezoelectric simulation analysis | 7 |
| 2.1 Piezoelectric theoretical | 7 |
| 2.1.1 Piezoelectric effect and piezoelectric equations | 7 |
| 2.1.2 Piezoelectric materials | 9 |
| 2.1.3 Connection and support of Piezoelectric vibration | 10 |
| 2.1.4 Mathematical model of Piezoelectric cantilever | 11 |
| 2.2 Simulation analysis of Piezoelectric cantilever | 16 |
| 2.2.1 Finite element theory | 16 |
| 2.2.2 Finite element analysis | 17 |
| 2.2.3 Piezoelectric coupling field analysis | 18 |
| 2.2.4 Finite element analysis steps | 19 |
| 2.2.5 Piezoelectric material parameters set | 20 |
| 2.2.6 Piezoelectric cantilever beam model | 23 |
| 2.2.7 Analysis results of Piezoelectric cantilever beam | 23 |
| Chapter 3 Automotive vibration analysis and Simulink simulation | 30 |
| 3.1 Automotive vibration analysis | 30 |
| 3.1.1 Automotive vibration analysis of Smooth road | 31 |
| 3.1.2 Automotive vibration analysis of incentive | 33 |
| 3.2 Simulink simulation | 36 |
| 3.2.1 Simulation of vibration system model | 36 |
| 3.2.2 The road roughness power spectral density | 39 |
| 3.2.3 Other parameters set | 42 |
| 3.2.4 Vibration simulation results | 43 |
| Chapter 4 Experiments and analysis of vehicle vibration | 49 |

| | |
|--|-----------|
| 4.1 Vehicle vibration test | 49 |
| 4.1.1 Experimental platform | 49 |
| 4.1.2 Results..... | 50 |
| 4.2 Energy harvesting and Results | 56 |
| 4.2.1Energy harvesting experiment | 56 |
| 4.2.2 The experiment Results..... | 57 |
| Chapter 5 Summary and Outlook | 62 |
| 5.1 Summary | 62 |
| 5.2 Outlook | 62 |
| References | 错误！未定义书签。 |
| Acknowledgements | 错误！未定义书签。 |
| Achievement | 错误！未定义书签。 |

第一章 绪论

1.1 背景

近年来石油等常规能源日益紧缺，能源危机和环境问题日益严重，因此各国研究人员都努力寻找各种能代替石油的清洁型新能源，如核能、风能、太阳能、潮汐能、振动能等。

在这些能源中太阳能是最成熟的技术之一，阳光照射高纯单晶硅光电池，可以达到 20% 以上的转化效率，产生数 μW 至 kW 量级的电能输出，应用于 MEMS 静电执行器、掌上电脑、卫星、照明和加热器等。虽然太阳能电池寿命长，在直射的阳光下具有非常高的能量密度，但极大的受到光照条件的限制，在较弱的光线下或者无光情况下表现很差。

热能是自然界普遍存在的另一种能源，将热电偶放置在热梯度空间时，可将热转化为电，可应用于穿戴设备上的微能源装置。该技术利用热应变材料在一定温差范围内发生相变时热膨胀系数显著增加的特点，将热应变材料与电活性材料复合，实现热应力到电能的转换。然而，热电转化效率低，理论转换效率只有 5.5% 左右，并且需要较大温差，很难在一般的应用环境中采用。同时，它不适合微能源器件，因为微小的体积获取大的热梯度非常困难。

海洋的潮汐能、风能、生物组织的生化能、燃料电池等也是微能源研究领域重要的能量来源方式。但是，这些能量采集方式同样都受到相应的应用环境限制。

然而，振动机械能是一种存在范围很广的能量形式，振动在我们周围普遍存在，它会带来噪声污染，加速设备损耗，也造成能源的浪费。研究压电发电装置，回收振动能量，不仅可以减少振动带来的不利影响，而且可以达到对能源的充分利用，对保护环境促进资源节约型、环境友好型社会发展是一种有益的尝试和推进。将机械振动转化为电能所采用的方法有 3 种：静电式、电磁式和压电式。静电式通过可变电容因振动造成的容量变化来实现。这种方法最吸引人的特性是具有 IC 相容性，可以通过硅微加工技术制造，并进行批量生产。但是为了实现电容两端的电压约束或电荷约束，需要独立的电源支持。电磁式通过导体在磁场中

的振动来产生电能。这种方式产生的感应电压很小,使用变压器、提高线圈圈数和提高磁场强度可以提高感应电压,但这些方法都受到尺寸的限制。

压电式通过压电效应把机械能转换为电能。这种方式通常采用悬臂梁结构并在悬臂独立端上放置质量块来构成振荡系统。压电转换方式具有很多优点。首先与上述两种能量转化方式相比,可以达到更高的能量密度;其次可以直接产生合适的电压,不需要变压;第三它不像静电转换那样需要初始电压;第四,它没有结构设计限制,从理论上说它的机械阻尼系数可以设计得比较小;最后,压电装置没有电磁干扰。

1.2 压电发电技术国内外研究现状

目前世界各国都致力于对清洁、可靠、廉价的微能源装置进行研究,并着手研制基于压电原理的微型能源装置,为各类便携式传感器、监控系统、MEMS 系统等微系统提供能源。

1984 年,美国科学家 Hausler 与 Stein 将 PVDF(聚偏氟乙烯)薄片安置在生物体上,以生物体呼吸时肋骨伸张运动所产生的能量作为研究基础,将生物体运动时产生的能量转换为电能,驱动外部设备。压电微电源固定在狗肋骨上,利用狗的自然呼吸可产生 18 V 电压,能量 $17 \mu\text{W}$ 。优化 PVDF 压电换能元件形状,同时设计更适合贴在动物肋骨上的辅助设备,最终测试发现输出能量能够达到 $1 \text{ mW}^{[1]}$ 。

1996 年,英国科学家 Williams 和 Yates 提出“在振动环境中嵌入压电陶瓷来进行能量采集”的方案。在能量采集过程中,通过谐波分析仪来测量压电式自供能装置的发电能力。试验分析发现自供能装置内部的压电陶瓷发电总量与其变形频率的立方成正比。此自供能装置在 70 Hz 的振动频率下产生 $1 \mu\text{W}$ 的能量,在振动激励为 330 Hz 的情况下产生 0.1 mW 能量。该实验表明,压电陶瓷可以作为机械能与电能之间的转化媒介,但要在低频振动下实现更多的电能转化,必须提高能量转换效率^[2]。

1998 年,美国麻省理工大学科学家 Kymissis 研究了将压电微电源安置入鞋内驱动传感器的可行性。安置压电冲击式装置或一个旋转性电磁装置在鞋后跟

处,同时安装一个 PVDF 材料的薄板在鞋子的前鞋底处。测试发现压电式冲击机构产生峰值电能为 80 mW ,PVDF 材料峰值电能达到 20 mW ,电磁式机构峰值电能为 20 mW 。由于外界激励缓慢,PVDF 装置和冲击式压电装置的平均电能都很低,大约在 1 至 2 mW 之间。在周期为 5 s 时,电磁式机构的峰值功 1 W ,平均功率为 0.25 W 。但电磁式结构不易实现,安装在鞋子里很困难,并受步伐影响,不像 PVDF 和压电冲击机构那样灵敏。试验测试发现鞋里的压电式能量捕获装置发出的信号为每步 12 字节。此研究证明了压电发电装置在自供能系统中应用的可行性,表现出了吸收外界能量应用于传送数据的能力^[3]。

2005 年,Jeon 等人研制了一种 d33 模式的悬臂梁结构压电发电机。悬臂梁由 SiO_2 或 SiNx 膜层、 ZrO_2 层、PZT 层以及相互交叉的电极(Pt/Ti)和质量块构成。其中, ZrO_2 层能够阻止压电层中电荷的逃逸。研究表明:d33 模式的压电发电装置能够产生更高的电压,同样的悬臂梁尺寸,产生的电压至少比 d31 模式的压电装置高 20 倍。悬臂梁有 3 个不同共振模式,在 13.91 kHz 的振动频率下,其悬臂梁顶端位移最大,故可以获得最大能量。在此共振频率下,负载电压随负载电阻的增加而增加,电阻达到 $10.1\text{ M}\Omega$ 时电压为 3 V ,而功率在负载为 $5.2\text{ M}\Omega$ 时达到最大值 $1.01\text{ }\mu\text{W}$,此时,直流电压为 2.4 V ,响应的能量密度为 0.74 mWh/cm^2 ^[4]。

2006 年,日本开始在压电发电方式上做出尝试,将“发电地板”放置在地铁的检票通道,利用上下班高峰的人力踩压发电,如图 1.1 所示。据报道,通过二年的改进,08 年 1 月发电地板每天已经能够产生 500 千瓦秒(约 0.14 度)的能量。不过若想维持自动检票机工作,还需提高 25 倍的电量^[5]。

2006 年,美国德克萨斯州大学的电子工程师沙善克·普里业发明了一种可以为无线网络供电的袖珍风车,如图 1.2 所示。这种风车周长大约为 10 厘米,它附在一个旋转凸轮上,当凸轮旋转时可使一系列压电晶体不断伸缩。当压电材料被挤压或伸展时便会产生电能。时速为 16 公里的微风便可以产生 7.5 毫瓦的持续电能,这足以保证一个电子传感器的运转,可以为完整的无线传感器网络供电。与利用风力涡轮机为电网供电的常规发电机相比,这种压电发电机的发电效率要更优。一个压电发电机的转换效率能达到 18%,而同尺寸的常规发电机仅能将可利用风能的 1%直接转换为电能^[6]。



图 1.1 检票口的黑色发电地板

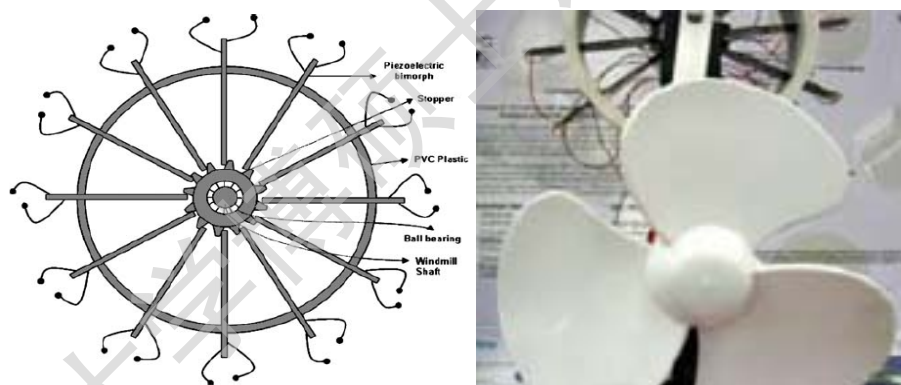


图 1.2 压电袖珍风车发电机

2009 年, 比利时 Interuniversity Microelectronics Center 的 M Renaud 和 P Fiorini 等人设计并分析了一种能够采集人手臂运动能量的低频压电弯曲结构, 研究表明, 在通过一定负载时 25 cm^3 质量为 60 g 的发电机构在每秒转动 180° 时功率为 $47\text{ }\mu\text{ W}$, 在 10 Hz 的频率和 10 cm 线性振幅时功率可达到 $600\text{ }\mu\text{ W}$ ^[7]。

2010 年, 以色列的一家公司研制出了基于压电换能器的路面能量收集系统: **Innowattech piezoelectric generator**, 当单车道的货车交通量超过 500 辆/h 时, 每公里每车道最多可以收集到 250 kW 的电能^[8]。

同年,吉林大学的闫世伟等人利用压电材料将汽车在行驶过程中轮胎振动的机械能转换为电能,收集用作 TPMS (汽车轮胎报警器) 监测模块的电源,以取代传统电池。但其局限于仅利用轮胎振动为 TPMS 供能,车身的振动能却没能很好的利用^[9]。

2011年中国汽车产销双双突破1800万辆,中国正在成为全球最大的新兴汽车市场。同时中国的汽车保有量已突破1亿辆大关,已超过日本的7000万辆,仅次于美国的2.85亿辆,位居世界第二。汽车电子产品已经占到整车价值的25%–30%。在汽车电子化过程中,作为汽车大脑的ECU“神经系统”的传感器具有难以忽视的关键作用。传感器被广泛应用于汽车轮胎、安全气囊、底盘系统、发动机运行管理系统、废气与空气质量控制系统、ABS、车辆行驶安全系统、汽车防盗系统、发动机燃烧控制系统、定位系统以及其他系统中^[10]。

通常这些传感器由汽车车载电池通过电线连接进行供能。如此多的传感器安装在汽车上,线路连接布线变得复杂、维修变得很麻烦,并且有一些嵌入式的传感器不能利用车载电池通过供电线来连接,如胎压监测传感器还需要电池单独供电。因此,利用周围的环境能量为汽车中的分布式或嵌入式无线传感器供能有了实际意义。它可以减少安装维修带来的麻烦,还可以降低费用等。本文结合压电发电系统与汽车振动系统,利用压电材料对汽车行驶中的附属能量进行采集,就地取材得为汽车上的传感器提供电源。

1.3 本文研究的主要内容

本文在国内外研究的基础上,以理论分析、仿真模拟和实验相结合的方法系统分析了结合压电发电系统与汽车振动系统,利用压电材料对汽车行驶中的附属能量进行采集,就地取材得为汽车上的传感器提供电源。主要研究内容有:

- (1) 研究压电理论基础及对压电振子进行仿真分析;
- (2) 建立汽车 1/2 系统的振动数学模型,并通过 SIMULINK 仿真分析了汽车行驶中不同路面、速度下由于路面不平度而产生的振动状态,实验验证了汽车车身行驶中的振动状态和仿真结果吻合;
- (3) 设计相关的压电能量收集装置;
- (4) 实验利用压电能量收集装置采集汽车振动时的附属能量,得到输出电压及

功率。

通过实验表明：压电能量收集装置采集的汽车振动能量在路况较差（E 级路面及以上）足够为单个传感器供能，同时如果能对压电能量收集装置进一步优化，将能进一步提高功率，为更多或者功耗更大的传感器供能。

厦门大学博硕士论文摘要库

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库